جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارهٔ سی و ششم، زمستان ۱۳۹۹

صص ۱۵۹-۱۴۳

: https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.67026.0

مقاله پژوهشی

ارزیابی ناهمگونی مکانی در کیفیت بوم‌شناختی با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو)

سعیده رنجبر[1]- دانشجوی کارشناسی ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

حمیدرضا کامیاب- استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/٤ تاریخ بازنگری : ۱۳۹۹/۱۰/۲۱ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

چکیده

محیط‌زیست در حال تجربه تغییرات مختلف محیط‌زیستی است که هم منشأ انسانی و هم منشأ طبیعی دارند. تغییرات کاربری زمین در حوزه قره‌سو، نیاز به مطالعه درباره کیفیت بوم‌شناختی این منطقه را نشان می‌دهد. در این مطالعه، شاخص سنجش‌ازدوری کیفیت بوم‌شناختی (RSEI) بر اساس چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ و با استفاده از داده‌های میانگین تصاویر تابستانه ماهواره لندست در سال‌های ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷ (سنجنده‌های ETM+/OLI/TIRS)، برای ارزیابی تغییرات کیفیت بوم‌شناختی در حوزه قره‌سو استان گلستان استفاده شد. شاخص‌های مورد نیاز برای استخراج شاخص کیفیت بوم‌شناختی با ایجاد شاخص فشار محیط‌زیستی (NDBI)، شاخص وضعیت (NDVI) و شاخص‌های پاسخ اقلیمی محیط به تغییرات (LST و LSM) از سامانه گوگل ارث انجین انجام شد. در این پژوهش پس از تهیه شاخص‌های پایه، با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، وزن هر شاخص تهیه و سپس شاخص کیفیت بوم‌شناختی بر اساس مؤلفه اول تحلیل مؤلفه‌ها اصلی تهیه شد. تحلیل تغییرات مؤلفه اول با استفاده از روش آستانه‌گذاری نشان از افت کیفیت بوم‌شناختی دارد؛ به‌طوری‌که میانگین شاخص RSEI در سال ۱۳٦۸، ۰/۵۷ حاصل شد و در سال ۱۳۹۷ این مقدار به ۰/٤۸ رسید که نشان دهنده کاهش مقدار RSEI است. همچنین میزان طبقه خیلی خوب در سال ۱۳٦۸، ۳۲۸۲۱/۸۳ (۱٦/۲٦۷ درصد) و در سال ۱۳۹۷، ۳٦۸۷۹/٦٦ (۱۸/۲۷ درصد) است. نتایج تحلیل مکانی نشان داد که مقدار ضعیف کیفیت بوم‌شناختی شاخص RSEI در بخش‌های

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۳۸٦۷۵۱٦

Email: s_ranjbar1387@yahoo.com

شمالی منطقه رخ داده است که به دلیل رشد سریع مناطق انسان‌ساخت بوده است. این تغییر در افزایش شاخص مناطق انسان‌ساخت در این مناطق مشخص است.

کلیدواژه‌ها: کیفیت بوم‌شناختی، شاخص RSEI، گوگل ارث انجین، حوزه قره‌سو.

۱- مقدمه

شدت رشد جمعیت و فعالیت‌های انسانی بخش زیادی از زیست‌کره زمین و جو را تحت تأثیر قرار داده و باعث از بین رفتن زیستگاه‌ها، تخریب عملکردهای اکوسیستم و تغییرات آب‌وهوای جهانی شده است (فولی [1] و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژانگ [2] و همکاران، ۲۰۱٦). به‌عبارت‌دیگر، مداخلات انسان در طبیعت باعث تأثیرات قابل‌توجه بر انعطاف‌پذیری، مقاومت و آسیب‌پذیری اکوسیستم‌ها می‌شود (ژو [3]، ۲۰۰۸؛ ژو و همکاران، ۲۰۰۹؛ سدون [4] و همکاران، ۲۰۱٦). مطالعات یکپارچه در زمینه محیط‌زیست، باید تغییرات محیط‌زیستی حاصل از موضوعاتی چون تغییرات آب‌وهوای جهانی و تأثیرات انسانی بر منابع را بهتر اندازه‌گیری کند (نیمی و دونالد [5]، ۲۰۰٤). برای درک شرایط فعلی یا پیش‌بینی تغییرات آینده اکوسیستم‌ها می‌توان از شاخص‌های بوم‌شناختی استفاده کرد. شاخص‌ها معمولاً الگوهای ارزیابی عددی هستند که اطلاعات کلیدی در مورد سیستم‌های طبیعی، اجتماعی و اقتصادی را ارائه می‌دهند. شاخص‌ها، فراتر از داده‌های ساده، روند یا روابط علت و معلولی را نیز نشان می‌دهند. سه هدف کلیدی استفاده شاخص‌ها عبارتند از: بالا بردن سطح آگاهی و درک، اطلاع‌رسانی جهت تصمیم‌گیری و اندازه‌گیری میزان پیشرفت اهداف تعیین شده (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰). شاخص‌ها به‌عنوان ابزاری برای کمّی‌سازی میزان پیشرفت به‌سوی توسعه پایدار در سطوح مختلف محلی، منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی استفاده می‌شوند (ولوا [6] و همکاران، ۲۰۰۱).

ارزیابی پایداری به‌ویژه ارزیابی پایداری محیط‌زیستی به‌وسیله مجموعه‌ای از معیارها و شاخص‌ها میسر خواهد بود. براین اساس شاخص‌های محیط‌زیستی به‌عنوان عناصر عملیاتی و نماینده پدیده‌های سازمانی جهت ارزیابی و سنجش پایداری هستند (هنری و جورنلت [7]، ۲۰۰۸). شاخص‌های محیط‌زیستی باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که دارای شرایطی باشند که عبارتند از: منعکس‌کننده وضعیت منابع محیط‌زیستی در جهت درک پویایی سیستم‌های طبیعی بوده و ارتباط بین مؤلفه‌های مختلف محیط‌زیست را مشخص نمایند، تجزیه‌وتحلیل ارزیابی و سنجش بین اهداف (توسعه و حفاظت از محیط‌زیست) را تسهیل نمایند و به تدوین سیاست‌های تصمیم‌گیری و تخصیص منابع کمک کنند (پروتو [8] ۲۰۰۸).

---

1 Foley
2 Zhang
3 Xu
4 Seddon
5 Niemi and McDonald
6 Veleva
7 Henri and Journeault
8 Perotto

به دلیل نیاز جهانی برای ارزیابی کمّی شرایط بوم‌شناسی در سطوح مختلف جهت پایش، حفاظت و یا ترمیم، می‌توان از شاخص‌های بوم‌شناختی استفاده کرد (نییمی و دونالد، ۲۰۰٤؛ هینز[1]، ۲۰۰۲). شاخص‌های بوم‌شناختی نشان‌دهنده الگویی ساده و یکپارچه از جنبه‌های مختلف یک اکوسیستم پیچیده ازجمله ساختار، عملکرد، ترکیب و تغییرات آن‌ها هستند (دیل و بیلر[2]، ۲۰۰۱؛ لین [3]و همکاران، ۲۰۰۹ و ۲۰۱٦) که به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی وضعیت محیط‌زیست، شناسایی تغییرات یا روندهای محیطی، تشخیص علت تغییر محیط و یا پیش‌بینی تغییرات آینده محیط استفاده می‌شود (دیل و بیلر، ۲۰۰۱؛ بهلین [4]و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژانگ [5]و همکاران، ۲۰۱٦). شاخص‌های بوم‌شناختی امکان تفکیک جنبه‌های کلیدی اکوسیستم را از تغییرات کوچک فراهم می‌کند. در سه دهه گذشته، توسعه و استفاده از شاخص‌های بوم‌شناختی شتاب سریع علمی داشته است.

مطالعات مختلفی در زمینه استفاده از شاخص‌ها برای بررسی سلامت بوم‌شناختی در سطح دنیا انجام شده است. رباطی (۱۳۹٤) با استفاده از مدل شاخص ترکیبی به بررسی کیفیت محیط‌زیست شهری در شهر تهران پرداخت. نتایج نشان داد که مناطق تهران از نظر شرایط محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی در شرایط ناهمگون و ناموزونی قرار دارند. صیدی و همکاران (۱۳۹۷)، برای ارزیابی کیفیت محیط‌زیست شهری در شهر تهران از چهار شاخص LST، NDVI، NDWI، و NDBI استفاده کردند. نتایج نشان داد بالاترین میزان کیفیت محیط شهری در مناطق ۱، ۳، ۷ نسبت به سایر مناطق تهران است. Hu و Xu (۲۰۱۸)، با استفاده از شاخص بوم‌شناختی و سنجش‌ازدور میزان ناهمگونی شهری در شهر Fuzhou را بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱٦ موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان شاخص بوم‌شناسی از ۰/۲٦۷ در سال ۲۰۰۰ به میزان ۰/۵۰۳ در سال ۲۰۱٦ افزایش پیدا کرده است. استفاده از داده-های سنجش‌ازدور در بررسی سلامت بوم‌شناختی در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است. به‌عنوان نمونه Musse و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون به بررسی شاخص‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور ازجمله LST، NDVI، SAVI، NHI، NDBI، NDISI، NDWI و شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی (تراکم جمعیت، تراکم مسکن و قیمت مسکن) و پوشش خدمات عمومی (آب، فاضلاب، برق و زباله) در کلمبیا پرداختند. Yue و همکاران (۲۰۱۹)، نیز از شاخص سلامت بوم‌شناختی برای نظارت بر تغییرات کیفیت بوم‌شناسی در ۳۵ شهر اصلی چین با استفاده از چهار شاخص NDVI، LST، NDBSI و LSM استفاده کردند. در مطالعه Jing و همکاران (۲۰۲۰) نیز از شاخص-های NDVI، LST، LSM و NDBSI برای بررسی کیفیت محیط‌زیست در تالاب ابینور در چین استفاده شد. این

1 Heinz
2 Dale and Beyeler
3 Lin
4 Behling
5 Zhang

مطالعات و تحقیقات مشابه، مانند مطالعـه Halmy (۲۰۱۹) و Wen و همکـاران (۲۰۲۰)، اهمیـت ارزیـابی و سـلامت بوم‌شناختی را با استفاده از شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد.

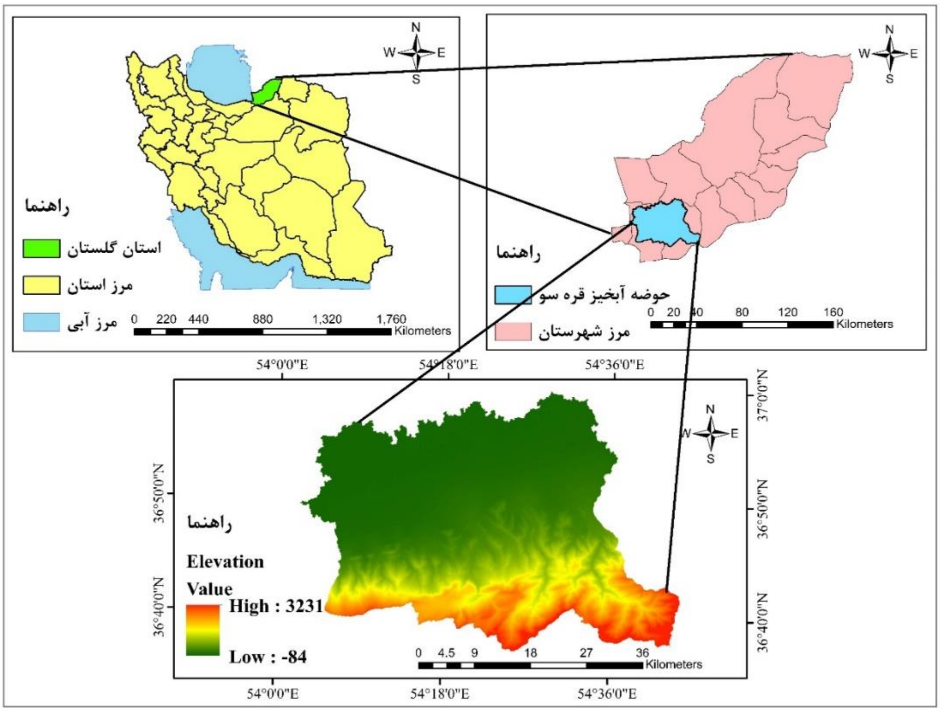
مرور مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که بررسی سلامت بوم‌شـناختی در سـطح دنیـا از اهمیـت قابـل‌توجهی برخوردار است. با استفاده از سنجش‌ازدور و شاخص‌های بوم‌شناسی می‌توان سـلامت بـوم‌شناسـی منـاطق مختلـف را بررسی نمود و برنامه‌ریزی‌های درست را در منطقه انجام داد. هـدف از ایـن پـژوهش بررسـی سـلامت بـوم‌شـناختی حوضه آبخیز قره‌سو با استفاده از یک شاخص جدید بوم‌شناختی مبتنی بـر سـنجش‌ازدور (RSEI[1]) در سـامانه گوگـل ارث انجین (GEE[2]) است. معیارهای مورد نیاز برای استخراج شاخص RSEI بـا اسـتفاده از رویکـرد فشـار–حالـت–پاسخ (PSR)[3] به دست آمده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- منطقه موردمطالعه

حوزه آبخیز قره‌سو با ۱۶۱۳۴۹ هکتار مساحت در محدوده طول جغرافیـایی″۹۲ ′۲۲ °۵٤ تـا ″۰٦ ′٤۳ °٥٤ شـرقی و عرض جغرافیایی ″۵۲ ′۳۷ °۳٦ تا ″۲۳ ′۵۹ °۳٦ شمالی قرار دارد (شکل ۱). حوزه آبخیز قره‌سو از شمال و شـرق بـه حوضهٔ آبخیزگرگانرود، از جنوب به حوزه آبخیز نکارود و از غرب به حوزه آبخیـز خلـیج گرگـان و نیـز بـه دریاچـه بزرگ خزر محدود می‌شود. این حوزه ۸ درصد از مساحت استان گلسـتان را تشـکیل مـی‌دهـد. سـطح عمـده حـوزه آبخیز قره‌سو در جنوب توسط جنگل پوشیده شده و در شمال حوضه دشت آبرفتـی بـا کـاربری زراعـی و مسـکونی سطح حوزه را تشکیل می‌دهد. این حوزه آبخیز شامل شـهرهای گرگـان، کردکـوی، آق‌قلـا و بنـدر تـرکمن در اسـتان گلستان می‌باشد (سالنامه آماری استان گلستان، ۱۳۹۳).

1 Remote Sensing Ecological Index
2 Google Earth Engine
3 Pressure State Response (PSR)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز قره‌سو

۲-۲- روش کار

در این پژوهش، با توجه به نتایج استفاده از رویکرد فشار–حالت–پاسخ و جهت استخراج شاخص نهایی RSEI، از چهار شاخص سنجش‌ازدوری اراضی ساخته شده (فشار) (NDBI)[1]، تراکم پوشش گیاهی (وضعیت) (NDVI)[2]، دمای سطح زمین (پاسخ) (LST)[3]، رطوبت سطح زمین (پاسخ) (LSM)[4] برای سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۹۷ استفاده شده است. با توجه به قابلیت‌های سامانه گوگل ارث انجین در پردازش داده‌های ماهواره‌ای چندزمانه، بخش اصلی تحلیل و استخراج شاخص‌ها در این سامانه انجام گرفته است.

۲- ۲- ۱- گوگل ارث انجین (GEE)

گوگل ارث انجین یک سامانه محاسباتی برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و سایر داده‌های جغرافیایی است. این سامانه امکان دسترسی به یک بانک اطلاعاتی بزرگ از تصاویر ماهواره‌ای و قدرت محاسباتی لازم برای تجزیه‌وتحلیل آن تصاویر را فراهم می‌کند. گوگل ارث انجین یک بستر سنجش‌ازدور مبتنی بر وب است که دارای قابلیت فراوان در

1 Normalized Difference Built-up Index
2 Normalized Difference Vegetation Index
3 Land Surface Temperature
4 Land Surface Moisture

انجام تحلیل‌های همزمان مکانی و زمانی بر روی بیش از یک مجموعه از تصاویر ماهواره‌ای است. در این پژوهش از تصاویر چند زمانه تابستان ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷ مربوط به ماهواره‌های لندست ۵ و لندست ۸ استفاده شد (جدول ۱). با توجه به قابلیت‌های این سامانه در تحلیل داده‌های مکانی چندزمانه، میانگین شاخص‌ها در سامانه گوگل ارث انجین به‌صورت مستقیم و بر اساس داده‌های ماه‌های تابستان (بازه تیر تا شهریور) استخراج گردید. با توجه به تأثیر مستقیم رطوبت در برخی از شاخص‌های مورداستفاده در این مطالعه، بازه تابستانه جهت کاهش اثرات رطوبت مورداستفاده قرار گرفته است. استفاده از تصاویر متعدد به‌جای یک تصویر باعث کاهش خطاهای رادیومتریک محتمل در نتایج می‌گردد. به دلیل تعداد زیاد تصاویر مورداستفاده در این مطالعه، از تصاویر تصحیح شده رادیومتریک و هندسی موجود در سامانه استفاده گردید. ضمن آن‌که بازه تاریخی مورداستفاده در یک دوره بلندمدت (۲۹ سال در این مطالعه) امکان کشف تغییرات عمده و اصلی را از تغییرات محلی و کوچک فراهم می‌سازد.

جدول ۱- تصاویر چندزمانه استفاده شده در سال‌های ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷.

تاریخ	ماهواره	سنجنده	ردیف/ مسیر	تاریخ تصویربرداری
۱۳٦۸	لندست ۵	TM	۱٦۳/۳٤	ابتدای تیر تا انتهای شهریور
۱۳۹۷	لندست ۸	OLI, TIRS	۱٦۳/۳٤	ابتدای تیر تا انتهای شهریور

۲-۲-۲- تهیه شاخص‌ها

با توجه به مطالعات مختلف صورت گرفته در زمینه کیفیت بوم‌شناختی جهت استخراج شاخص نهایی RSEI، مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار بر کیفیت بوم‌شناختی چهار شاخص اراضی ساخته شده، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و رطوبت سطح زمین می‌باشد که در این پژوهش نیز از این چهار شاخص استفاده شده است (Hu & Xu, 2018; Yue et al., 2019; Jing et al., 2020).

۲- ۲- ۲- ۱- شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص‌های پوشش گیاهی به‌طور گسترده به‌عنوان معیارهایی برای تجزیه‌وتحلیل پوشش گیاهی مورداستفاده قرار می‌گیرند. شاخص‌های مختلفی مانند RVI، NDVI، SAVI، EVI و دیگر شاخص‌های مشابه برای مطالعه ویژگی‌های پوشش گیاهی معرفی شده است (Koh et al., 2006). شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای پایش تغییرات پوشش گیاهی است که از طریق نسبت‌گیری باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک به دست می‌آید (Binh et al., 2005). شاخص NDVI از رابطه ۱ حاصل می‌شود.

رابطه ۱: $$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$$

که در آن:

NIR، باند مادون قرمز نزدیک و R، باند قرمز است.

بازه عددی حاصل از این شاخص از ۱- تا ۱+ است. در مناطقی که دارای سبزینگی بیشتر است این شاخص به سمت ۱+ میل می‌کند (Gessesse & Melesse, 2019).

۲-۲-۲-۲- شاخص اراضی ساخته شده (NDBI)

ازجمله راه‌های استخراج شدت استفاده انسانی از زمین و یا اثر انسان و کاربری‌های انسان‌ساخت می‌توان به شاخص اراضی انسان‌ساخت (NDBI) اشاره کرد. برای محاسبه شاخص اراضی انسان‌ساخت در این مطالعه از شاخص NDBI استفاده شده است (Kaplan, 2018). (رابطه ۲).

رابطه ۲:
$$NDBI = \frac{SWIR1 - \mathrm{NIR}}{\mathrm{SWIR1+NIR}}$$

که در آن: NIR = باند مادون قرمز نزدیک، و SWIR1 = باند مادون قرمز میانی اول (باند ۵ در تصاویر سنجنده-های لندست) است.

۲- ۲- ۲- ۳- شاخص رطوبت سطح زمین LSM

تحول اجزا محیطی به‌طور گسترده در مطالعات پایش محیط‌زیستی مورداستفاده قرار گرفته می‌گیرد (Huang *et al*., 2002). نمونه‌ای از این مؤلفه‌ها رطوبت است که شاخص‌های متعددی مانند NDMI (میزان رطوبت پوشش گیاهی)، NMDI (میزان رطوبت خاک) و LSM (رطوبت سطح زمین) برای استخراج آن ایجاد شده است. در این پژوهش، جهت استخراج رطوبت سطح زمین (**LSM**) برای داده‌های لندست ۵ و ۸ از رابطه ۳ استفاده می‌شود (Wang & Qu, 2007).

رابطه ۳:

LSM_{TM} (لندست ۵)= 0.0315 ρBlue + 0.2021 ρGreen + 0.3102 ρRed + 0.1594 ρNIR - 0.6806 ρSWIR1 - 0.6109 ρSWIR2

LSM_{OLI} (لندست ۸)= 0.1511 ρBlue + 0.1973 ρGreen + 0.3283 ρRed + 0.3407 ρNIR - 0.7117 ρSWIR1 - 0.4559 ρSWIR2

که در آن: Blue = باند آبی، Green = باند سبز، Red = باند قرمز، NIR = باند مادون قرمز نزدیک، SWIR1, 2 = باندهای مادون قرمز میانی اول (باند ۵) و دوم (باند ۷) است.

۲- ۲- ۲- ٤- شاخص دمای سطح زمین (LST)

روش‌های مختلفی جهت محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای وجود دارد (Tsou et al., 2017).

در این پژوهش، دمای سطح زمین با استفاده از دمای روشنایی باندهای حرارتی و محاسبه شاخص پوشش گیاهی صورت می‌گیرد که از باندهای قرمز، مادون قرمز نزدیک و باند حرارتی استفاده شده است. مراحل استخراج این شاخص به‌صورت زیر است.

الف) تصحیح مقدار بازتاب در باندهای حرارتی برای کاهش خطاهای انرژی منعکس شده از اشیا روی سطوح زمین که بر اساس رابطه ٤ محاسبه می‌شود (Barsi et al., 2014; Rajeshwari & Mani, 2014).

رابطه ٤: $L_\lambda = ML * Q_{CAL} + A_L$

که در آن: L_λ = تابش طیفی، ML = میزان تابش، Q_{CAL} = ارزش سلول (DN)، و A_L = میزان درخشندگی را نشان می‌دهد. جهت تجزیه‌وتحلیل دمای تابش به‌صورت واحد سلیسیوس (°C) برای داده‌های لندست از رابطه ۵ استفاده می‌شود (Rajeshwari & Mani, 2014; Advan & Jovanovski, 2016).

رابطه ۵: $$TB = \frac{K2}{Ln\left[\left(\frac{K1}{L\lambda}\right)+1\right]} - 273.15$$

که در آن: K1 و K2 میزان ثابت حرارتی است.

ب) تهیه شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI): نحوه استخراج این شاخص در بخش ۲-۲-۲-۱ ارائه شده است.

ج) استخراج نسبت پوشش گیاهی: جهت تهیه این بخش از پوشش گیاهی حداقل، پوشش گیاهی حداکثر و پوشش گیاهی کل استفاده می‌شود که از رابطه ٦ محاسبه می‌شود (Rajeshwari & Mani, 2014; Advan & Jovanovski, 2016).

رابطه ٦: $$Pv = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2$$

که در آن: NDVI: تراکم پوشش گیاهی، $NDVI_{min}$: پوشش گیاهی حداقل، و $NDVI_{max}$: پوشش گیاهی حداکثر است.

د) محاسبه انتشار: مقدار انتشار از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (USGS, 2013).

رابطه ۷: $e = 0.004 * pv + 0.986$

که در آن: Pv = نسبت پوشش گیاهی است.

ه) تبدیل به دمای سطح زمین: این تبدیل با استفاده از رابطه ۸ که حاصل از مراحل قبل است، حاصل می‌شود (USGS, 2013).

رابطه ۸: $T = TB/ [1 + (\lambda*TB/14380) * Ln (e)]$

که در آن: TB = دمای سلیسیوس حاصل از رابطه ۲، λ = طول‌موج تابش ساطع شده برای باند حرارتی (جدول ۲) و e = انتشار است.

جدول ۲- طول‌موج تابش ساطع شده ماهواره‌های لندست

ماهواره	باند	λ(µm)
لندست ٤، ٥ و ٧	٦	۱۱/٤٥
لندست ۸	۱۰	۱۰/۸
لندست ۸	۱۱	۱۲

۲- ۳- محاسبه شاخص RSEI

شاخص RSEI ابزاری برای بررسی کمّی و کیفی سلامت بوم‌شناختی است. این شاخص اولین بار توسط Hu و Xu (۲۰۱۸) ارائه شده است. شاخص‌های مورداستفاده برای سلامت بوم‌شناختی وزن‌های متفاوتی دارند. رویکردهای مختلفی برای وزن‌دهی به شاخص‌ها وجود دارد. در شاخص RSEI از رویه آماری PCA برای بررسی اثرگذاری شاخص‌های مختلف بر شاخص نهایی سلامت بوم‌شناختی استفاده شده است. PCA یک رویکرد آماری برای فشرده‌سازی چندبعدی داده‌ها است که اثرات همبستگی بین متغیرها و شاخص‌های ورودی را حذف می‌کند. در این تحلیل، شاخص‌های ورودی تبدیل به مؤلفه‌های غیرهمبسته می‌شوند. قبل از اجرای PCA، چهار شاخص موردبررسی در بازه‌های ۰ تا ۱ قرار گرفتند و سپس PCA محاسبه شد. برای استخراج شاخص RSEI از اولین مؤلفه PCA که بیشترین درصد تغییرات را دارا است استفاده شد (رابطه ۹).

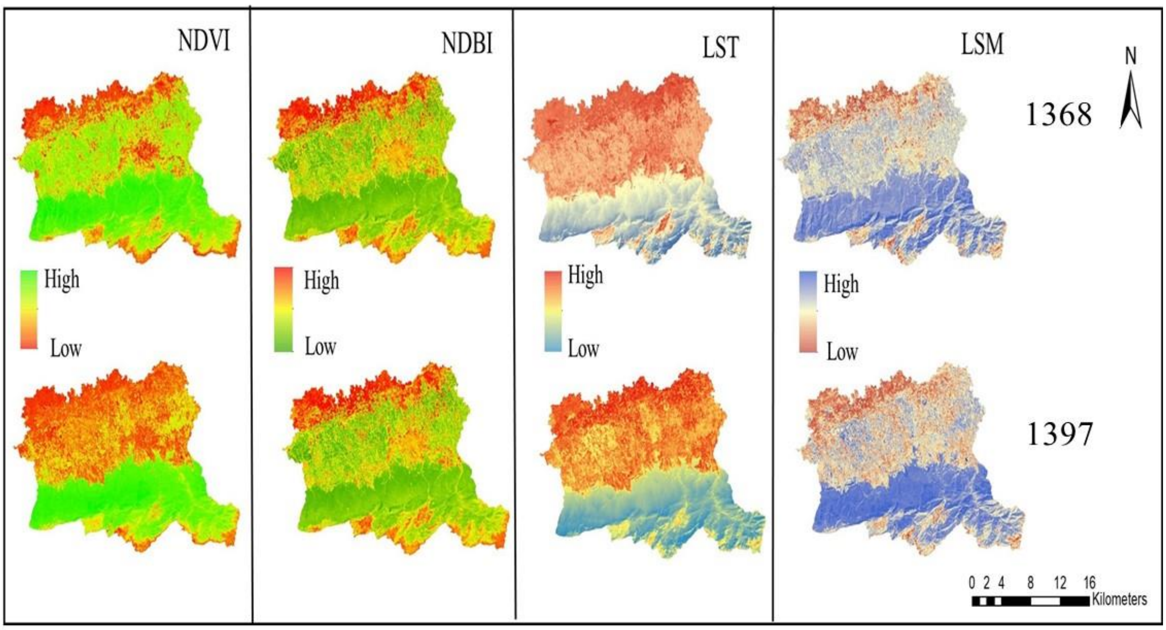
رابطه ۹: $RSEI_0 = PC1 [f (NDVI; LSM; LST ; NDBSI)]$

مقدار بالاتر شاخص RSEI نشان‌دهنده کیفیت بالاتر بوم‌شناختی در منطقه است. در مواردی که نقش شاخص-های مثبت (مانند تراکم پوشش گیاهی) در مؤلفه اول PCA منفی باشد (مانند مطالعه حاضر)، با استفاده از رابطه ۱۰ شاخص اصلاح می‌شود تا مقادیر بالاتر نشان دهنده وضعیت بوم‌شناختی بهتری باشد (Hu & Xu, 2018).

رابطه ۱۰: $RSEI = 1 – RSEI0 = 1 - PC1[f (Wet, NDVI, LST, NDBSI)]$

۳- نتایج و بحث

شاخص‌های تراکم پوشش گیاهی، اراضی ساخته شده، رطوبت سطح زمین و دمای سطح زمین برای سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۹۷ محاسبه شد (شکل ۲). شکل ۲ و جدول ۳ نشان می‌دهد که میزان شاخص NDBI در سال ۱۳۹۷ افزایش چشمگیری نسبت به سال ۱۳۶۸ داشته و میانگین این شاخص از ۰/۴۴ در سال ۱۳۶۸ به ۰/۶۰ در سال ۱۳۹۷ افزایش یافته است. شاخص NDVI نیز به دلیل کاهش پوشش گیاهی و تخریب پوشش در منطقه، کاهش داشته است، به‌طوری‌که از مقدار ۰/۵۴ در سال ۱۳۶۸ به مقدار ۰/۴۹ در سال ۱۳۹۷ رسیده است. میانگین شاخص‌های LSM و LST در سال ۱۳۶۸ نسبت به سال ۱۳۹۷ کاهش داشته و این میزان در شاخص LSM از ۰/۸۲ به ۰/۷۶ و در شاخص LST از مقدار ۰/۶۰ به ۰/۵۵ رسیده است.



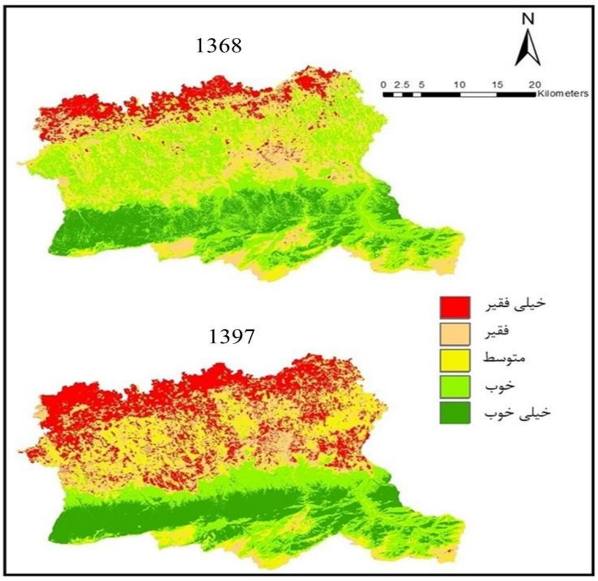
شکل ۲- شاخص‌های NDVI، NDBI، LSM و LST در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۹۷.

تحلیل PCA برای شاخص‌های چهارگانه انجام و مؤلفه اول به‌عنوان شاخص RSEI استخراج گردید. میانگین شاخص RSEI در سال ۱۳۶۸، ۰/۵۷ حاصل شد و در سال ۱۳۹۷ این مقدار به ۰/۴۸ رسید که نشان دهنده کاهش مقدار RSEI است. افزایش ساخت‌وساز در منطقه و افزایش تغییرات کاربری تأثیر بسزایی در کاهش میزان سلامت بوم‌شناسی در منطقه داشته است.

جدول ۳- نتایج حاصل از تهیه شاخص‌ها و تحلیل مؤلفه اصلی

	۱۳۹۷			۱۳۶۸		
	PC1	انحراف استاندارد	میانگین	PC1	انحراف استاندارد	میانگین
NDVI	−۰/۴۳۴	۰/۱۵	۰/۴۹	−۰/۴۷۶	۰/۱۳	۰/۵۴
NDBI	۰/۵۱۲	۰/۱۶	۰/۶۰	۰/۵۸۶	۰/۱۳	۰/۴۴
LST	۰/۴۰۲	۰/۲۳	۰/۵۵	۰/۴۶۸	۰/۱۷	۰/۶۰
LSM	−۰/۵۷۳	۰/۰۶	۰/۷۶	−۰/۵۳۶	۰/۱۴	۰/۸۲
RSEI		۰/۱۵	۰/۴۸		۰/۱۳	۰/۵۷

نقشه RSEI برای سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۹۷ در پنج طبقه خیلی فقیر (۰/۲–۰)، فقیر (۰/۴–۰/۲)، متوسط (۰/۶–۰/۴)، خوب (۰/۸–۰/۶) و خیلی خوب (۱–۰/۸) طبقه‌بندی شدند (شکل ۳). نتایج نشان می‌دهد که میزان مساحت طبقه خیلی فقیر در سال ۱۳۶۸، ۱۶۸۰۵/۷۹ هکتار و در سال ۱۳۹۷، ۴۳۴۲۸/۳۳ هکتار بوده است. مساحت طبقه فقیر نیز در سال ۱۳۶۸ به میزان ۳۷۹۴۵/۶۲ هکتار بوده اما در سال ۱۳۹۷ به ۴۶۹۵۴/۸ هکتار رسیده است که نشان از افزایش این دو طبقه داشته است. مساحت طبقه متوسط و خوب هم در دوره زمانی ۱۳۹۷–۱۳۶۸ در منطقه کاهش داشته است. مساحت طبقه متوسط از ۲۰ درصد به ۱۷ درصد و مساحت طبقه خوب از ۳۶ درصد به ۱۹ درصد رسیده است. مقدار مساحت طبقه خیلی خوب در سال ۱۳۶۸، ۳۲۸۲۱/۸۳ هکتار بوده که این مقدار در سال ۱۳۹۷ به ۳۶۸۷۹/۶۶ هکتار رسیده است که نشان‌دهنده افزایش اندک این مقدار است (جدول ٤).



شکل ۳- نقشه حاصل از طبقه‌بندی کیفیت بوم‌شناسی حوضه آبخیز قره‌سو در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۹۷

جدول ٤- مساحت (هکتار) و درصد ٥ طبقه خیلی فقیر، فقیر، خوب و خیلی خوب در سال‌های ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷

سال	خیلی فقیر		فقیر		متوسط		خوب		خیلی خوب	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
۱۳٦۸	۱٦۸۰٥/۷۹	۸/۳۲۹	۳۷۹٤٥/٦۲	۱۸/۸۰٦	٤۰۹۹۹/۳۲	۲۰/۳۲۰	۷۳۱۹۲/٥۹	۳٦/۲۷٦	۳۲۸۲۱/۸۳	۱٦/۲٦۷
۱۳۹۷	٤۳٤۲۸/۳۳	۲۱/۲٤	٤٦۹٥٤/۸	۲۳/۲۷۲	۳٤٥۰۷/۸۹	۱۷/۱۰۳	۳۹۹۹٤/٤۷	۱۹/۸۲۲	۳٦۸۷۹/٦٦	۱۸/۲۷۸

نتایج نشان می‌دهد که میزان طبقات خیلی فقیر و فقیر در سال ۱۳۹۷ به‌شدت نسبت به سال ۱۳٦۸ بیشتر شده است و مقدار طبقات متوسط و خوب به‌شدت کاسته شده و میزان خیلی خوب مقدار اندکی افزایش داشته است. این نتایج نشان دهنده کاهش میزان کیفیت بوم‌شناسی در این حوضه آبخیز است.

با تطابق دادن نقشه کیفیت بوم‌شناختی طبقه‌بندی شده مربوط به دو سال ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷، نقشه نحوه تبدیل طبقات مختلف کیفیت بوم‌شناسی حوضه آبخیز قره تهیه شد (جدول ٥). نتایج نشان داد که بیشترین تبدیل طبقات در این بخش تبدیل طبقه متوسط به فقیر با تبدیل ۱۱۲۱۳/۲۹٤ هکتار و سپس تبدیل فقیر به خیلی فقیر با ۱۰۸۳٦/۳۳۲ هکتار است. کمترین تبدیل طبقات نیز تبدیل خیلی فقیر به خیلی خوب، خوب و خیلی فقیر به خوب بود که به ترتیب صفر و ٥/۰۲۷ هکتار بوده است (جدول ٥).

جدول ٥- نتایج حاصل از تبدیل طبقات مختلف کیفیت بو شناسی در سال‌های ۱۳٦۸ به ۱۳۹۷

سال		خیلی فقیر	فقیر	متوسط	خوب	خیلی خوب
۱۳۹۷-۱۳٦۸	خیلی فقیر	-	۱۹٤٤/۷٦۰	۳۷۱/۹۳٥	٥/۰۲۷	۰
	فقیر	۱۰۸۳٦/۳۳۲	-	٥۰۳٦/۸٦۱	۲۲۰/۸۱٥	۱۳/۰۲٤
	متوسط	٦٤٤۹/۸۸۲	۱۱۲۱۳/۲۹٤	-	۳۳۹٦/۲٤٦	۷٤/۲٦٥
	خوب	٦۳۰۲/٦٤٦	۱۰۱۰۳/۷۳۳	۱۰٥۳٤/۳۹٦	-	۹۱٦٤/۷۹
	خیلی خوب	۷/٦۱٦	۱۳/٦۳٤	۳۰/٦۹٦	٥۹٥٤/۱۷۰	-

۳- ۱- بررسی معناداری تغییرات با روش آستانه‌گذاری

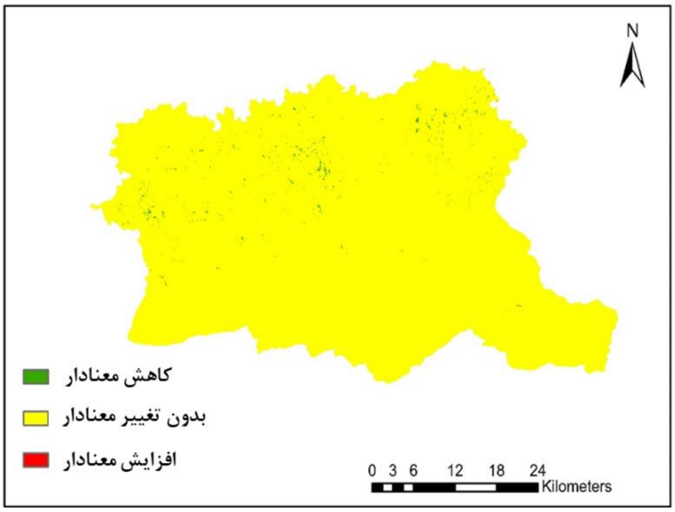
بررسی معناداری تغییرات گام مهمی برای تحلیل تغییرات است. آستانه‌گذاری[1] رویکردی آماری برای بررسی معناداری تغییرات است (Eastman, 2015). در این رویکرد و با فرض نرمال بودن داده‌ها، آستانه‌های بالا و پایین برای تغییرات تعریف می‌گردد. مقادیر خارج از محدوده آستانه به‌عنوان تغییرات معنادار شناسایی می‌گردد. در داده‌های با توزیع نرمال، ۹۹ درصد داده‌ها در محدوده ۳ انحراف معیار حول میانگین قرار دارد و مقادیر خارج از این محدوده که بسیار نادر هستند به‌عنوان تغییرات معنادار در منطقه استخراج می‌گردد (Eastman, 2015). برای تهیه

1 Thresholding

نقشه معنادار تغییرات، ابتدا تغییرات شاخص RSEI سال ۱۳۹۷ و سال ۱۳٦۸ طبق رابطه زیر استخراج می‌شود (رابطه ۱۱):

رابطه ۱۱: شاخص RSEI (۱۳٦۸) – شاخص RSEI (۱۳۹۷) = تغییرات شاخص RSEI

ارزش منفی معنادار، نشان‌دهنده کاهش معنادار کیفیت بوم‌شناختی و ارزش مثبت معنادار به‌عنوان افزایش معنادار کیفیت بوم‌شناختی استخراج شد (شکل ٤).



شکل ٤- نقشه تغییرات معنادار در سال‌های ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷.

مساحت تغییرات صورت گرفته در جدول ٦ نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات معنادار در بخش بدون تغییرات با مساحت ۲۰۱۰۱۱/٦ هکتار و بعدازآن افزایش معنادار با ۳٤/۷٤ هکتار است و کمترین مقدار معنادار در طبقه کاهش معنادار با ۷۱۸/۸۳ هکتار است.

جدول ٦-تغییرات مساحت حاصل از معناداری تغییرات

نام طبقه	کاهش معنادار	بدون تغییر معنادار	افزایش معنادار
مساحت	۷۱۸/۸۳	۲۰۱۰۱۱/٦	۳٤/۷٤
درصد	۰/۳٥٦	۹۹/٦۲٦	۰/۰۱۷

٤- جمع‌بندی

در این مطالعه از شاخص بوم‌شناسی مبتنی بر سنجش‌ازدور (RSEI) برای ارزیابی ویژگی‌های توزیع مکانی و زمانی شرایط بوم‌شناسی حوضه آبخیز قره‌سو استفاده شد. جهت افزایش دقت محاسبات از تصاویر چند زمانه تابستانه لندست TM و OLI در سال‌های ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷ در سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد. استفاده از این

سامانه این قابلیت را دارد که بتوان تصاویر متعدد مربوط به بازه موردنظر را همزمان و به‌صورت برخط تحلیل کرد. ضمن آنکه استفاده از داده‌های چندزمانه (که در این مطالعه با صورت از میانگین‌گیری تصاویر چندزمانه استفاده شده است) خطاهای موجود در داده‌های تک‌زمانه که ممکن است به دلیل مختلف ایجاد شده و بر کیفیت نتایج اثرگذار باشد را کاهش می‌دهد. سنجش‌ازدور برای اندازه‌گیری تقریباً مداوم توزیع فضایی شرایط محیطزیستی دارای ارزش است و معیارهای اندازه‌گیری فرایندهای محیطزیستی را فراهم می‌کند. در این مطالعه از چهار شاخص NDVI، NDBI، LSM و LST استفاده شد و بعد از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، شاخص RSEI تهیه شد. به‌کارگیری شاخص‌ها جهت بررسی شرایط موجود در یک منطقه در مطالعات فراوان بررسی شده است، اما آنچه که در این مطالعه فراتر از سایر مطالعات به آن پرداخته شده است بررسی تجمیعی این شاخص‌ها جهت استخراج یک شاخص برای نشان دادن وضعیت بوم‌شناختی حوضه قره‌سو است. با مرور منابع مشخص گردید که نمونه مشابهی با این رویکرد در مطالعات داخل کشور وجود ندارد. نتایج حاصل نشان داد که وضعیت کیفیت بوم‌شناسی در حوضه آبخیز قره‌سو کاهش چشمگیری داشته به صورتی که میانگین آن در سال ۱۳٦۸ مقدار ۰/۵۷ بوده اما در سال ۱۳۹۷ این مقدار به ۰/۴۸ رسیده است. نتایج مربوط به ضرایب بارگذاری مربوط به شاخص‌ها در مؤلفه اول PCA نشان می‌دهد که بیشترین میزان تغییرات شاخص کیفیت بوم‌شناختی در سال ۱۳٦۸ و ۱۳۹۷ متأثر از دو شاخص مناطق انسان‌ساخت و رطوبت سطح خاک بوده است. به‌گونه‌ای که میزان این بارگذاری در مؤلفه اول برای این دو شاخص بیش از ۰/۵۰ بوده است. این نتایج نقش عامل انسانی را در افت کیفیت بوم‌شناختی منطقه به‌خوبی نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات صورت گرفته در میزان کیفیت بوم‌شناختی منطقه مربوط به کمربند میانی منطقه و در بین اراضی کشاورزی صورت گرفته است و تغییر نوع کاشت محصول و تبدیل به اراضی خشک می‌تواند یکی از عوامل باشد که این نتایج با نتایج مختاری و همکاران (۱۳۹۸)، مهری و همکاران (۱۳۹۷) همخوانی دارد. کمترین تغییرات نیز در بخش کمربند جنوبی منطقه و در بخش‌های جنگلی صورت گرفته است. نتایج مطالعات دیگر (راحلی نمین و مرتضوی (۱۳۹۷)) که به تغییرات پوشش کاربری در حوضه آبخیز قره‌سو طی سال‌های ۱۳٦٦ و ۱۳۸۸ پرداختند نیز نشان داد که بیشترین تغییرات حاصل شده، ساخت‌وسازهای انسانی در بخش شمال منطقه طی این سال‌ها بوده است. همچنین مطالعه مهری و همکاران (۱۳۹۷) که بر تغییرات کاربری حوضه آبخیز قره‌سو در سال‌ها ۱۳٦۳ و ۱۳۹۲ پرداختند نشان دهنده کاهش ۱۲ درصدی مساحت جنگل و ۵ درصدی کشاورزی و افزایش ۲۹ درصدی مساحت مناطق انسان‌ساخت و ۱٤ درصدی مرتع است که با نتایج حاصل از کیفیت بوم‌شناختی این پژوهش که کاهش میزان کیفیت بوم‌شناختی می‌باشد، نیز همخوانی دارد. از شاخص RSEI می‌توان برای نظارت بر وضعیت محیطزیست منطقه‌ای استفاده کرد. NDBI و LST می‌توانند اثرات منفی بر RSEI ایجاد کنند، درحالی‌که NDVI و رطوبت سطح زمین دارای اثرات مثبت بر RSEI هستند. RSEI نه‌تنها یک مقدار عددی واحد برای

توصیف یک شرایط کلی محیطزیستی فراهم می‌کند ، بلکه یک تصویر محیطزیستی قابل مشاهده نیز دارد که موقعیت و میزان شرایط مختلف محیطزیستی را نشان می‌دهد. چنین اطلاعاتی برای فرآیند تصمیم‌گیری در مورد مدیریت و بازیابی کیفیت محیطزیستی منطقه ازجمله اقدامات کنترل تخریب جنگل از اهمیت بسیاری بالایی برخوردار است. بنابراین، RSEI می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب برای نظارت بر وضعیت بوم‌شناختی منطقه باشد. از تکنیک RSEI به‌عنوان یک روش برای تعیین کمیت و شناسایی تغییرات بوم‌شناختی در طول زمان و در نتیجه ارتقا تشخیص تغییرات بوم‌شناختی در مقیاس‌های مختلف استفاده می‌شود. هدف توسعه RSEI، ارزیابی وضعیت بوم‌شناختی عمومی با استفاده از شاخص‌های مختلف است که کاملاً با شرایط عمومی بوم‌شناختی ارتباط دارند. اجرای برنامه‌ریزی علمی بوم‌شناسی منجر به بهبود کیفیت کلی بوم‌شناختی می‌شود. البته لازم به ذکر است که عدم قطعیت موجود در این مطالعه می‌تواند بر نتایج اثرگذار باشد. نمونه‌هایی از این عدم قطعیت را می‌توان در تأثیرپذیری شاخص‌ها از شرایط اتمسفری بیان نمود. اگرچه با تصحیح اتمسفری می‌توان میزان این نوع عدم قطعیت را کاهش داد، اما به دلیل استفاده از تصاویر متعدد در این مطالعه برای استخراج شاخص‌ها به تصحیحات اولیه ارائه شده بر روی تصاویر اکتفا شده است. با این‌حال استفاده از ابزار میانگین برای شاخص‌ها تا حد زیادی بر نویزهای موجود در تصاویر که به‌صورت داده‌هایی با فراوانی کمتر ظهور پیدا می‌کنند چیره می‌شود. ضمن آن‌که شاخص RSEI استفاده شده در این مطالعه نیز، به دلیل آن‌که مبتنی بر مؤلفه اول تحلیل مؤلفه‌های اصلی است، به دلیل عدم استفاده از مؤلفه‌های دیگر که در اکثر موارد شامل داده‌های مربوط به نویز با فراوانی کمتر هستند، تا حد زیادی اثرات اتمسفری را در نتایج حذف و یا کاهش می‌دهد.

کتابنامه

راحلی نمین، بهناز؛ مرتضوی، ثمر؛ ۱۳۹۷. پیش‌بینی روند تغییرات مکانی کاربری اراضی و توسعه مناطق مسکونی با استفاده از مدل زنجیرهای CA مارکوف و روش ژئومد، مطالعهٔ موردی: حوزه آبخیز قره‌سو، استان گلستان. *فصلنامه علمی – پژوهشی فضای جغرافیایی*. ۱۸ (٦٢). صص ١٦٩–١٥٩.

رباطی، م. ١٣٩٤. سنجش کیفیت محیطزیست شهری با به‌کارگیری مدل شاخص ترکیبی (موردمطالعه: کلان‌شهر تهران). *آمایش سرزمین*. شماره ۷ (۲). صص ۲۷۵–۲۵۵.

صیدی، سمیه؛ عبدی قروچای، ناهید؛ حسن‌زاده، امین؛ ۱۳۹۷. ارزیابی وضعیت کیفیت محیط شهری با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور. *فصلنامه پژوهش‌های علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی*. شماره ۲ (۱۳). صص ١١٣–١٢٦.

مختاری، محمدحسین؛ عابدیان، سحر؛ قلی‌پور، مصطفی؛ ۱۳۹۸. آشکارسازی و مدلسازی روند تغییرات کاربری اراضی جنگلی حوزه آبخیز قره‌سو با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین. *بوم‌شناسی کاربردی*. شماره ٤. صص ١٨–١.

مهری، آزاده؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ میکاییلی تبریزی، علیرضا؛ میرکریمی، سید حامد؛ ۱۳۹۷. ارزیابی اثرات بوم‌شناختی تغییر کاربری سرزمین بر ساختار طبیعی حوضه رودخانه قره‌سو. *آمایش سرزمین*. شماره ۱۰ (۱). صص ۱۱٦-۹۳.

Avdan U, Jovanovska G., 2016. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. Journal of Sensors 26: 1-8.

Barsi J, Schott J, Hook S, Raqueno N, Markham B, Radocinski R. 2014. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. Remote Sensing 6 (11): 11607-11626.

Behling R, Bochow M, Foerster S, Roessner S, Kaufmann, H., 2015. Automated GIS-based derivation of urban ecological indicators using hyperspectral remote sensing and height information. Ecological indicators 48: 218-234.

Binh TNKD, Vromant N, Hung NT, Hens L, Boon EK., 2005. Land cover changes between 1968 and 2003 in Cai Nuoc, Ca Mau peninsula, Vietnam. Environment, Development and Sustainability 7 (4): 519-536.

Dale VH, Beyeler SC., 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. Ecological indicators 1 (1): 3-10.

Eastman JR. 201. TerrSet tutorial. Clark University.

Foley JA, De Fries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik CJ, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, Snyder P. K. 2005. Global consequences of land use. Science. 309 :570–574.

Gessesse, A. A., & Melesse, A. M., (2019). Temporal relationships between time series CHIRPS-rainfall estimation and eMODIS-NDVI satellite images in Amhara Region, Ethiopia. In Extreme Hydrology and Climate Variability (pp. 81-92). Elsevier.

Halmy MWA., 2019. Assessing the impact of anthropogenic activities on the ecological quality of arid Mediterranean ecosystems (case study from the northwestern coast of Egypt). Ecological Indicators 101: 992-1003.

Heinz IIIHJ., 2002. The State of the Nation's Ecosystems: Measuring the Lands, Waters, and Living Resources of the United States: Cambridge University Press.

Hu X, Xu H., 2018. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. Ecological indicators 89: 11-21.

Huang C, Wylie B, Yang L, Homer C, Zylstra G., 2002. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. International journal of remote sensing 23 (8): 1741-1748.

Jing Y, Zhang F, He Y, Johnson VC, & Arikena, M., (2020). Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. Ecological Indicators 110, 105874.

Kaplan G, Avdan U, Avdan ZY., 2018. Urban heat island analysis using the landsat 8 satellite data: A case study in Skopje, Macedonia. In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings 2 (7).

Koh CN, Lee PF, Lin RS., 2006. Bird species richness patterns of northern Taiwan: primary productivity, human population density, and habitat heterogeneity. Diversity and Distributions 12 (5): 546-554.

Lin T, Ge R, Huang J, Zhao Q, Lin J, Huang N, Zhang G, Li X, Ye H, Yin K., 2016. A quantitative method to assess the ecological indicator system's effectiveness: a case study of the Ecological Province Construction Indicators of China. Ecological indicators 62: 95-100.

Lin T, Lin JY, Cui SH, Cameron S., 2009. Using a network framework to quantitatively select ecological indicators. Ecological Indicators 9 (6) : 1114-1120.

Musse MA, Barona DA, Rodriguez LMS., 2018. Urban environmental quality assessment using remote sensing and census data. International journal of applied earth observation and geoinformation 71: 95-108.

Niemi GJ, McDonald ME., 2004. Application of ecological indicators. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst 35: 89-111.

Rajeshwari A, Mani ND., 2014. Estimation of land surface temperature of Dindigul district using Landsat 8 data. International Journal of Research in Engineering and Technology 3 (5): 122-126.

Seddon AW, Macias-Fauria M, Long PR, Benz D, Willis KJ., 2016. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. Nature 531 (7593).

Tsou J, Zhuang J, Li Y, Zhang Y., 2017. Urban heat island assessment using the Landsat 8 data: a case study in Shenzhen and Hong Kong. Urban Science 1 (1): 1-20.

USGS ., 2013. United States Geological Survey, Landsat 8: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2013–3060. http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3060.

Wang L, Qu JJ., 2007. NMDI: A normalized multi- band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. Geophysical Research Letters 34 (20).

Wen X, Ming Y, Gao Y, Hu X., 2020. Dynamic Monitoring and Analysis of Ecological Quality of Pingtan Comprehensive Experimental Zone, a New Type of Sea Island City, Based on RSEI. Sustainability 12 (1), 21.

Xu H, Ding F, Wen X., 2009. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing 2 (2): 74-79.

Xu H. 2008. A new index for delineating built- up land features in satellite imagery. International Journal of Remote Sensing 29 (14): 4269-4276.

Yue H, Liu Y, Li Y, Lu Y., 2019. Eco-environmental quality assessment in China’s 35 major cities based on remote sensing ecological index. IEEE Access 7: 51295-51311.

Zhang J, Zhu Y, Fan F., 2016. Mapping and evaluation of landscape ecological status using geographic indices extracted from remote sensing imagery of the Pearl River Delta, China, between 1998 and 2008. Environmental Earth Sciences 75 (4): 1-16.